

道路用フェンス上部に設置した
クロスフロー風車の性能に関する研究

Study of Performance of a Cross-flow Wind Turbine
Located above a Roadway fence

金沢大学大学院自然科学研究科
システム創成科学専攻
機能開発システム講座

中田 博精

【Abstract】

Performance of a cross-flow wind turbine located above a fence and the associated velocity fields have been investigated experimentally. In the present study, four effects were examined. First, effects of the clearance between the wind turbine and the fence, and the turbine's horizontal positions from the fence were examined. When the turbine was rotating clockwise, i.e. the blades on the upstream side of the turbine were moving upward, and the clearance is small, the power coefficient of the turbine located in the downstream increased than that of the other horizontal position. Second, effects of the right angle deflection plate, which was installed above a porous fence to obtain an effect as if the turbine located downstream, were examined. The maximum power coefficients of the turbine with the deflector of $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, where α is the angle of the right angle deflector, were higher than that of the turbine located in the downstream. Third, effects of the nonporous area of the fence were examined. When the turbine was rotating clockwise, the maximum power coefficient increased with the increase in the nonporous area of the fence. Finally, the performance of a horizontal-axis cross-flow wind turbine and the flow field above a porous fence in oblique wind were examined. The maximum power coefficient of the turbine in the oblique wind was proportional to $\cos^2\theta$, where θ is inclined angle. In order to suppress the decrement of power, the deflector installed in front of a porous fence. The maximum power coefficient of the turbine located above a porous fence with deflectors at $\theta = 40^\circ$ is higher than that without deflectors. In oblique flow, a cross-flow wind turbine located above a porous fence with deflectors is expected to produce more power than that of the porous fence without deflector.

1. 緒論

風が強い道路側面や橋梁，トンネル出口等においては，横風によるトラックの転倒事故や雪混じりの視界不能によるドライバーの運転ミスを防ぐために，防風・防雪フェンスが設置されている．近年，環境問題などの対策として，二酸化炭素などの地球温暖化ガスを排出しないクリーンな自然エネルギーの1つである風力エネルギーを利用した発電が注目されている．抗力型風車の1つであるクロスフロー風車は，低風速から起動し，風向に対する指向性がなく，どの方向から風が吹いても発電できるといった長所を持つ．道路に沿って設置されている防風・防雪フェンス上部で，風上側からの吹き上がり流れの影響などから風速が増すことが一般的に知られている．そのため，フェンス上部にクロスフロー風車を水平に設置することによって，風車発電による道路標示の照明や指示灯などの電力補助とフェンス下流域における減速効果の向上が得られると考えた．

本研究では，クロスフロー風車を組み込んだ道路用フェンスの実用化に向けて，フェンス上部におけるクロスフロー風車の最適な設置方法と斜風時における風車の性能について明らかにすることを目的として，主に4つの風洞実験を行った．1つ目は，フェンスから高さ方向及び水平方向に移動させて風車を設置した場合の風車の回転方向と風車出力の関係を調べた．2つ目では，フェンスから水平に移動させた位置に風車を設置した場合と同じ効果を得るために，フェンスの上端に直角偏向板を設置した場合の風車出力に及ぼす影響を調べた．3つ目の実験としては，防雪フェンスの上部にクロスフロー風車を設置する場合を想定した場合の風車出力に及ぼす影響について調べた．最後に，斜めからの風（以下「斜風」という．）が風車出力に及ぼす影響と斜風に対する対策の有効性について調べた．

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

実験装置概略を図1に示す。本実験で使用した有孔板フェンス模型は、図1に示すように、フェンス高さ $H = 500 \text{ mm}$ 、幅 406 mm であり、直径 $d = 2 \text{ mm}$ の穴がピッチ $p = 3 \text{ mm}$ で開いている。フェンスの遮蔽率は $\phi = (\text{フェンス面積} - \text{開孔部面積}) / \text{フェンス面積} = 60\%$ である。

クロスフロー風車の概観を図2に示す。クロスフロー風車の寸法は外径 $D_1 = 80 \text{ mm}$ 、内径 $D_2 = 65 \text{ mm}$ 、スパン $L = 400 \text{ mm}$ であり、羽根入口角度 $\beta = 40^\circ$ 、翼弦長 $l_c = 10.35 \text{ mm}$ の円弧翼を $N = 15$ 枚有しており、ソリディティ $\sigma = (N \cdot l_c) / \{\pi(D_1 + D_2) / 2\} = 0.68$ である。

図3に本実験で用いた供試フェンスを示す。遮蔽率 $\phi = 60\%$ の有孔板フェンスと $\phi = 100\%$ の無孔板フェンス、遮蔽率のフェンスの上部から無孔板で遮蔽した場合及び下部から無孔板領域で遮蔽した場合の8種類について実験を行った。フェンス上部から25%の高さを無孔板で遮蔽した場合を25%upper、下部から25%の高さを無孔板で遮蔽した場合を25%lowerと表記する。

2.2 実験方法

図1に示すように、フェンス上部にクロスフロー風車を設置して実験を行った。風車の左側を上流側とした場合に、風車回転方向が時計回りのものをCWとし、反時計回りのものをCCWとした。また、フェンス上端と風車下端の隙間を C とし、風車の中心軸をフェンスから水平方向への移動距離を A とした。移動距離 A は、フェンスの下流側に移動させた場合に正の値になり、フェンスの上流側に移動させた場合には負の値になる。風車設置位置の評価の際には、隙間 C 及び移動距離 A を風車外径 D_1 で無次元化した値である、クリアランス $c (= C/D_1)$ 及び水平位置 $a (= A/D_1)$ を用いた。

風車はカップリングを介してトルク計、回転数検出器及び回転制御用DCモータに接続されている。風車出力係数 $C_p = P / (1/2 \rho L D_1 U^3)$ は、風洞ノズル出口中心の風速を主流風速 U として風車回転数 n を変化させ、各周速比 $\lambda (= D_1 \omega / 2U)$ における風車トルク T を測定して算出した。ここで、 $P (= T\omega)$ は風車出力、 $\omega (= 2\pi n / 60)$ は角速度、 ρ は空気密度である。なお、機械損失による影響を除去する

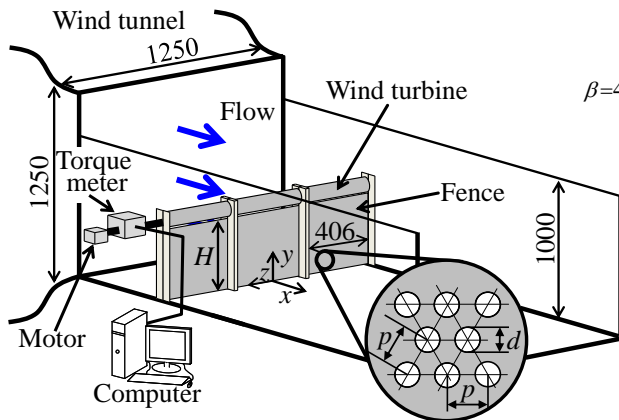


Fig.1 Experimental apparatus

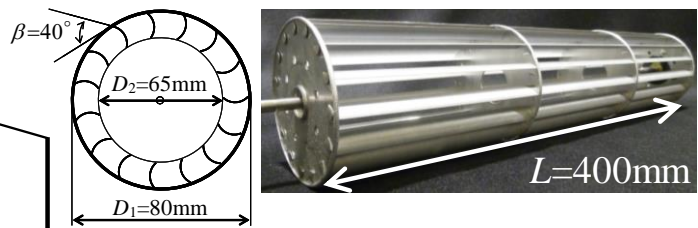


Fig.2 Cross-flow wind turbine

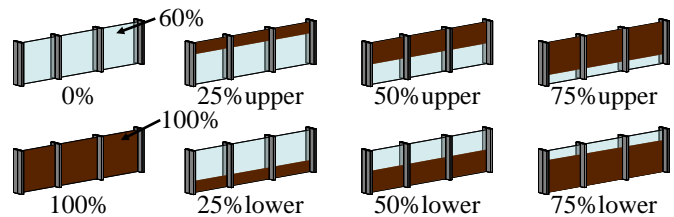


Fig.3 Porous fences

ために、あらかじめブレードを取り外した円板と軸のみの状態で回転させてトルク損失値を測定し、風車出力を補正した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 フェンス上部に設置した場合の風車出力特性と防風性能

3. 1. 1 垂直方向における設置位置の検討

遮蔽率 $\phi=60\%$ の有孔板フェンス直上 ($a=0.00$) にクロスフロー風車を設置して、クリアランス c を変化させた場合の風車回転方向 CW と CCW における最大出力係数 C_{Pmax} を風車単体の最大出力係数 $C_{Pmax(\text{Free-standing turbine})}$ との割合を図 4 に示す。なお、図中の $c=\infty$ は風車単体の値である。実験時の風速は $U=7\text{ m/s}$ とした。フェンスの上部にクロスフロー風車を設置することにより、風車回転方向によらず最大出力係数 C_{Pmax} は風車単体の場合よりも 2 倍程度増加する。風車回転方向 CW の場合、クリアランス c が小さい方が最大出力係数 C_{Pmax} が大きくなるが、クリアランス c が大きくなるにつれて最大出力係数 C_{Pmax} は低下する。クリアランス $c=0.0625$ の場合に最大出力係数が最も大きくなり、風車単体のときに比べて約 2.5 倍になる。風車回転方向 CW でクリアランス c が小さい場合は、フェンスで堰き止められ吹き上がる流れが風車回転方向と同じ方向であるために風車の回転が促進されて出力が向上する。しかし、クリアランス c が大きくなる場合は、フェンスと風車の隙間内の流れ（以下、「隙間流れ」という。）の流速が増加し、この流れが風車回転方向と逆向きであるため、出力は低下した。一方、風車回転方向 CCW の場合、クリアランス c が大きくなるにつれて最大出力係数は向上し、 $c>0.18$ では出力特性が変わらない。風車回転方向 CCW の場合、クリアランス c を大きくすることで、隙間流れの流速が増加し、その流れ方向と風車回転方向が同じであるため、出力が増加した。

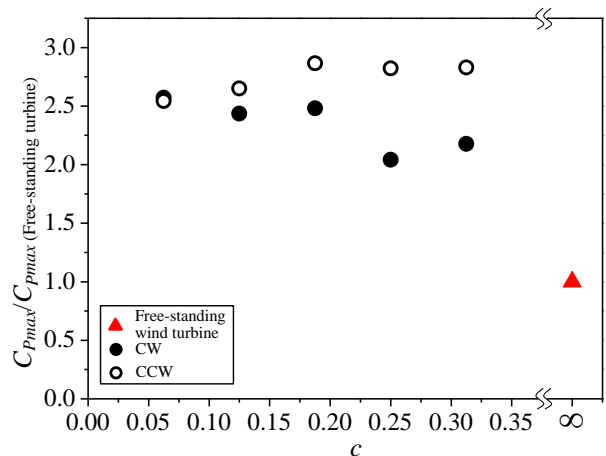


Fig.4 Maximum Power coefficient ratios vs. Clearance c

以上より、風車をフェンス直上 ($a=0.00$) に設置する場合、クリアランス c を小さく、風車回転方向 CW の風車を設置した場合に最も風車出力が大きくなるのがわかる。

3. 1. 2 水平方向における設置位置の検討

3.1.1 項で述べた、最も風車出力と減速効果が大きかったクリアランス $c=0.0625$ として風車を設置し、水平位置 a を変化させて実験を行った。風車回転方向 CW と CCW の場合の水平位置 a に対する最大出力係数 C_{Pmax} の変化を図 5 に示す。フェンスがない風車単体の場合における最大出力係数 C_{Pmax} を水平位置 $a=\infty$ として示している。また、図 6 にフェンス上部付近の風速分布と風車位置を破線で示す。図 6(a)では水平位置 $a=0.250, 0.625$ の場合の風車位置、図 6(b)には水平位置 $a=-0.250, -0.625$ の場合の風車位置も示す。風車回転方向 CW の場合、水平位置 $a=0.250 \sim 1.00$ の広い範囲で最大出力係数 C_{Pmax} が 0.25 以上となり、なだらかな山形の曲線を描く。図 6(a)より、風車をフェンス下流側に設置することで、風車の進み側ブレードが増速された風を受けるだけでなく、

戻り側のブレードが減速領域に入り、ブレーキとなる力が減少したためであると考えられる．一方で風車回転方向 **CW** の場合，最大で $C_{Pmax} \approx 0.22$ であり，風車出力の向上は風車回転方向 **CCW** の場合よりも小さくなる．さらに，水平位置 $a = -0.250$ の位置でピークを持つような曲線を描いており，その前後における最大出力係数 C_{Pmax} の低下割合が風車回転方向 **CW** よりも大きい．図 6(b)に示すように風車をフェンス上流側に設置した場合，戻り側ブレードに増速された風が当たることによって，風車出力は風車をフェンス直上 ($a = 0.00$) に設置した場合よりも低下する．これらのことから，発電に適する設置条件は，風車回転方向 **CW** で，フェンス下流側に風車を設置した状態であると言える．また，反対の方角から風が吹いて来る時も想定した場合には，風車回転方向も逆になるため，風車の水平位置は， $|a| = 0.25 \sim 0.5$ の範囲に設定すれば良い．

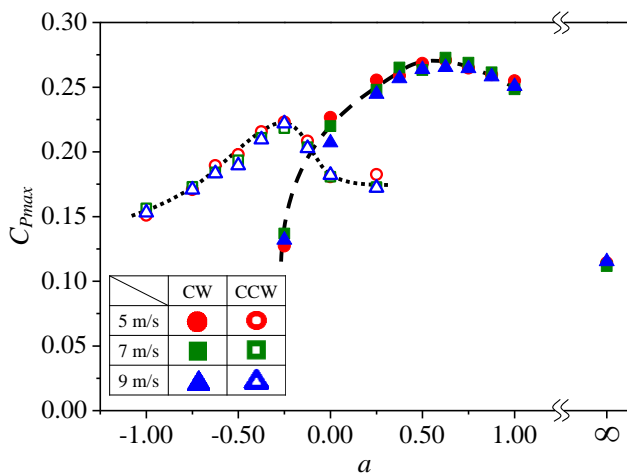


Fig.5 Maximum power coefficient C_{Pmax} vs. nondimensional horizontal distance a

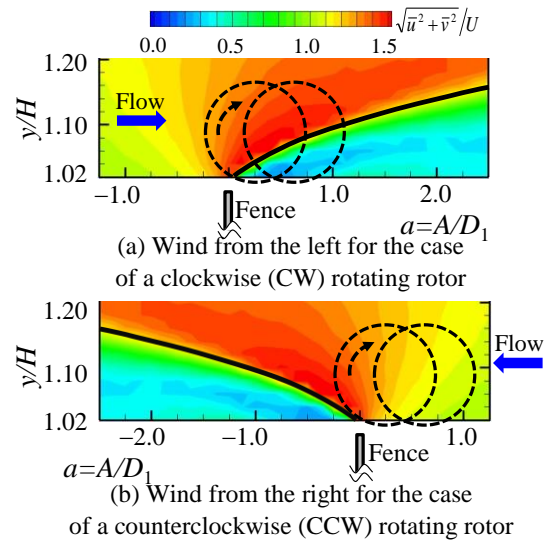


Fig.6 Optimum position of a cross-flow wind turbine above a porous fence

3. 2 フェンス上端に直角板を設置した場合の風車出力特性と防風性能

3.1 節では，フェンス上部にクロスフロー風車を風車回転方向 **CW** で設置する場合，フェンス下流側に移動させて設置することで風車出力が高くなることを示した．風車をフェンス下流側に設置した場合と同じ効果を得るためにフェンス上端に直角偏向板を設置した．本実験で用いた直角偏向板の各寸法を図 9 に示す．本実験では，図 7 に示す風車中心と直角偏向板の上端との角度 α を変化させた．

図 8 に直角偏向板を変化させた場合における最大出力係数 C_{Pmax} の結果を示す．図中には，風速 $U = 7 \text{ m/s}$ において風車をフェンス下流側 $a = 0.625$ の位置に設置した場合と風車単体の場合の最大出力係数 C_{Pmax} の結果も示す．なお， $\alpha = 0^\circ$ の結果は，フェンス上端に直角偏向板を取り付けていない状態を示している． $\alpha \geq 40^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けることで最大出力係数 C_{Pmax} は，風車をフェンス下流側 $a = 0.625$ の位置に設置した場合よりも大きく

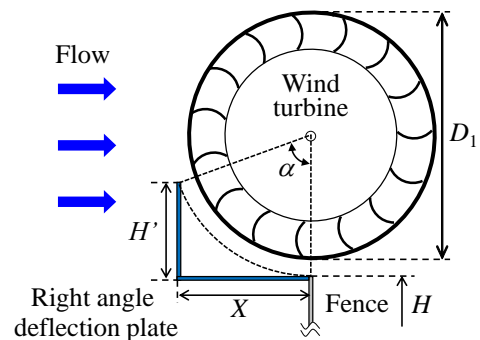


Fig.7 The right angle deflection plate

なっている． $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合は， α の増加に伴って，最大出力係数 C_{Pmax} は比例的に増加していき， $\alpha = 60^\circ$ のときにピークになる．しかし， $60^\circ < \alpha$ になることで最大出力係数 C_{Pmax} は大きく低下していく．

図 9 に $\alpha = 60^\circ, 80^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に設置した場合のフェンス上部付近の風速 $\sqrt{u^2+v^2}/U$ の分布を示す．図中には，点線で風車を設置した場合の風車の位置を示す．直角偏向板をフェンス上端に取り付けることで，吹き上がり流れの剥離位置が前方に移動し，直角偏向板の後方では風速がほぼ 0 m/s となり，大きな減速域が形成されている．このことより，フェンス上端に直角偏向板を取り付けたことで風車をフェンスに対して水平に移動させて設置した状態と同様の流れ場をフェンス直上において得られていることがわかる．最も大きい風車出力が得られた $\alpha = 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合のフェンス上部付近の風速分布を示している図 9(a) をみると，減速域になっている部分に風車下部が位置しており，風車上部が位置する部分に増速域が位置している．風車下部の戻り側ブレードが減速域に位置することにより風車の回転を抑制する力が小さくなり，一方で風車上部の進み側ブレードが増速域に位置することで風車の回転を促進されたと考えられ，これらの影響によって，風車出力が増加したと考えられる．図 9(b)に示すように，風車出力が低下した $\alpha = 80^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合では，風車下部の部分は減速域に位置しているものの，風車の出力を生み出す風車上部の進み側ブレードの部分にあたる増速域が小さいために風車出力が低下したと考えられる．

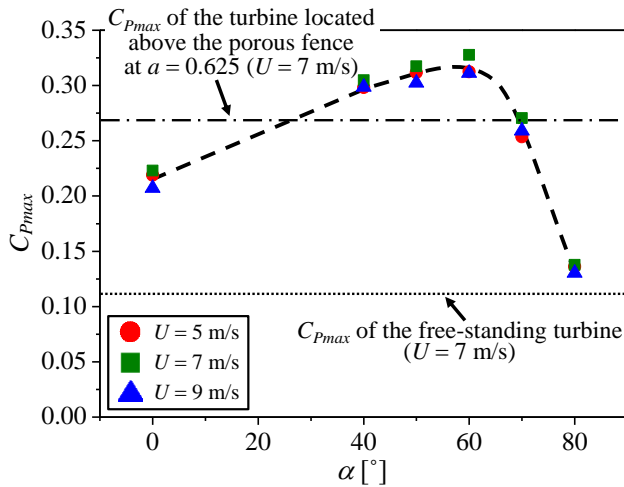


Fig.8 Maximum power coefficient C_{Pmax} vs. the angle of a right angle deflection plate α

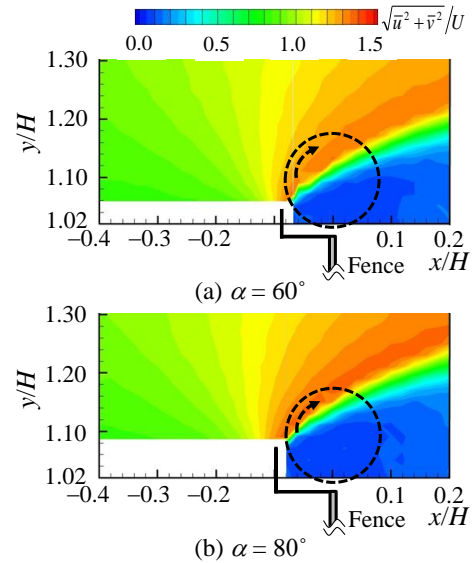


Fig.9 Maximum velocity contours of the upper region of the fence installed the deflection plate

3. 3 防雪フェンス上部に風車を設置した場合の風車出力特性

吹き払い式と吹き止め式防雪フェンスを模擬して，フェンス上部と下部に無孔板領域を設けた場合における，無孔板領域の変化が最大出力係数 C_{Pmax} に及ぼす影響について述べる．図 10 にクリアランス $c = 0.0625$ と $c = 0.313$ の場合での有孔板フェンス上部と下部の無孔板領域の変化に伴う最大出力係数 C_{Pmax} の変化を風車単体のときの最大出力係数 $C_{Pmax}(\text{Free-standing turbine})$ に対する比として示す．図 10(a)のフェンス上部に無孔板領域があり，風車回転方向 CW の場合，クリアランス c の大小に関わらず，無孔板領域が大きくなるにしたがって最大出力係数 C_{Pmax} が増加している．クリアランス

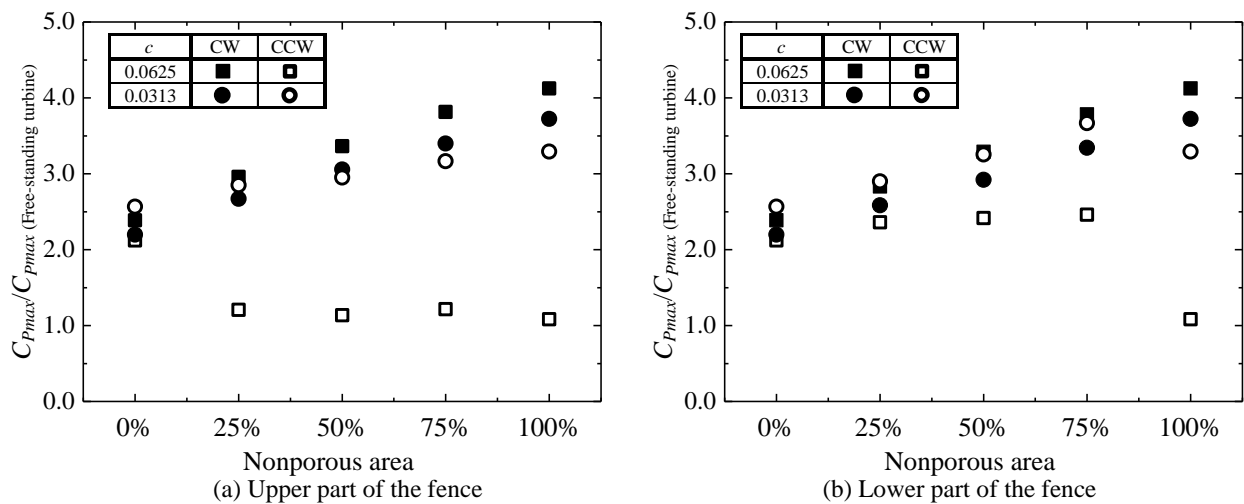


Fig.10 Maximum power coefficient C_{Pmax} vs. shielding area

$c = 0.0625$, 風車回転方向 CW で無孔板領域が 50%upper では、最大出力係数が風車単体の場合に比べ 3.3 倍になり、無孔板領域が 100%になると 4.1 倍に増加する。風車回転方向 CCW の場合、クリアランスが大きい $c = 0.313$ の場合においては風車回転方向 CW と同様に有孔板フェンス上部の無孔板領域が大きくなるにしたがって最大出力係数 C_{Pmax} が増加し、無孔板領域が 50%upper では風車単体の場合に比べ 2.9 倍になり、無孔板領域が 100%では 3.3 倍になる。しかし、風車回転方向 CW に比べると、無孔板領域が大きい場合の最大出力係数 C_{Pmax} は小さい。クリアランス が小さい $c = 0.0625$ においては、無孔板領域 25%以上で最大出力係数 C_{Pmax} が無孔板領域 0%の場合よりも大きく低下し、無孔板領域 100%の場合とほぼ同じ値になり、風車単体の場合に比べ 1.1 倍となる。有孔板フェンス上部に無孔板領域があり、風車回転方向 CW の場合、無孔板領域の増大に伴って吹き上がる流れも増速され、この流れが風車に対してプラスに回転力を発生する羽根に当たるため、風車出力が増加した。しかし風車回転方向 CCW の場合には、この吹き上がる流れが風車の回転を妨げる力を発生する羽根に衝突するため、風車出力の低下が起こる。一方で図 10(b)のフェンス下部に無孔板領域があり、風車回転方向 CW の場合、クリアランス c の大小に関わらず、無孔板領域が大きくなるにしたがって、最大出力係数 C_{Pmax} が増加している。クリアランス $c = 0.0625$, 風車回転方向 CW で無孔板領域が 50%lower では、最大出力係数が風車単体の場合に比べ 3.2 倍になり、無孔板領域が 100%になると 4.1 倍に増加する。これらの値は、吹き止め式防雪フェンスを模擬した場合の結果とほぼ同じ値になる。風車回転方向 CCW の場合も、無孔板領域が大きくなるにしたがって風車出力は増加する。しかし、無孔板領域が 100%になるとクリアランスに関わらず、最大出力係数 C_{Pmax} は低下する。風車単体に比べて最大出力係数は、クリアランス $c = 0.0625$ の場合は 1.1 倍、クリアランス $c = 0.313$ の場合は 3.2 倍となり、クリアランスの小さい $c = 0.0625$ の場合の方が大きく低下した。フェンス下方に無孔板領域がある場合もフェンス上部に無孔板領域がある場合と同様に、フェンスでせき止められた流れは吹き上がる流れに影響を与える。風車回転方向 CCW で無孔板領域が 100%の場合、クリアランスに関わらず、風車回転方向と吹き上がり流れの方向が逆であるために風車出力が低下すると考えられる。

3. 4 斜風時の風車出力特性とその対策

風車を回転方向 CW, クリアランス $c=0.0625$ で設置し, 斜風を模擬するために, 図 11 に示すように風車とフェンスの設置角度 θ を $0^\circ \sim 40^\circ$ まで変化させた. 風車の中心軸の高さ ($y=545\text{mm}$) を原点として長方形方向に y' とした. 設置角度 $\theta > 0^\circ$ における座標軸については, 風車軸に対して直角方向を ξ , 軸方向を ζ と定義する. 座標軸に対応する風速成分の定義は, ξ 方向成分を u_ξ , ζ 方向成分を w_ζ とする. また, 斜風時におけるフェンス上に設置した風車出力の低下を抑制するためにフェンス前面に長方形偏向板を設置し, その有効性について検討した. 図 12 には, 偏向板を設置した場合のフェンス概略図を示す. 長方形偏向板はフェンスと同じ高さ H で, 幅は $0.1H$ とした. 上流側フェンス前面に間隔 $p_d=1/3H$ で長方形偏向板を設置した.

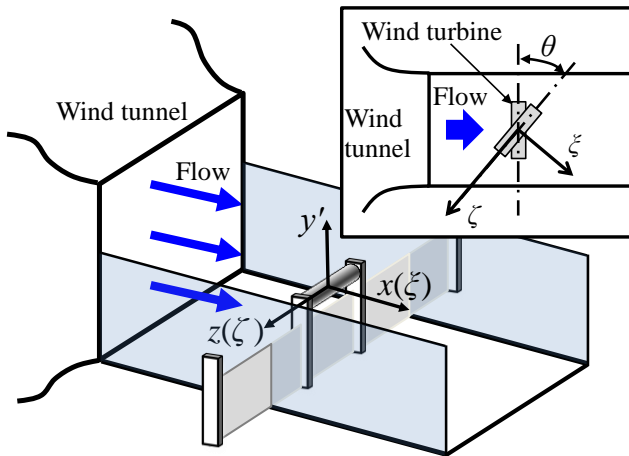


Fig.11 The experimental apparatus and coordinates system

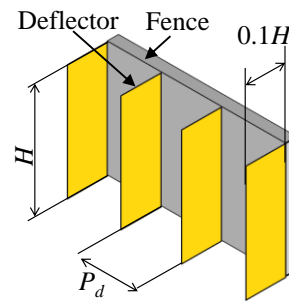


Fig.12 Fence with deflectors

3. 4. 1 斜風時の風車出力特性

図 13 に風車単体及びフェンス上部に設置した風車の各設置位置 θ に対する最大出力係数 C_{Pmax} を設置角度 $\theta=0^\circ$ のときの最大出力係数 $C_{Pmax}(\theta=0^\circ)$ との割合で示す. 図中には, 設置角度 θ に対する $\cos^2\theta$ と $\cos^3\theta$ の曲線も示す. 風を持つエネルギーは風速の 3 乗に比例することより, 最大出力係数の低下は $\cos^3\theta$ の曲線と一致すると予想されるが, 本研究のクロスフロー風車の出力は, $\cos^2\theta$ の曲線変化にほぼ一致する. またフェンス上部に風車を設置した場合においても, 風車設置位置に関係なく, 風車単体の場合と同様に最大出力係数の低下は $\cos^2\theta$ の曲線と一致した. 斜風時の風の流入角度と風車出力との関係については, まだ原因がわかっていないため, 今後さらに検討をしていく必要がある.

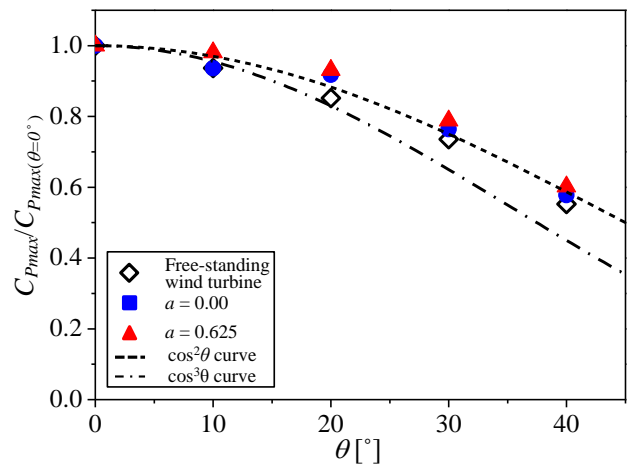


Fig.13 Maximum power coefficient ratios of the cross-flow wind turbine

3. 4. 2 フェンス偏向板を用いた斜風対策

クロスフロー風車をフェンス上部に設置した場合に, フェンス前面に長方形偏向板を設置することで, 斜風による風車出力の低下抑制が可能かどうかの検討を行った. 図 14 にフェンス直上

($a = 0.00$) とフェンス下流側 ($a = 0.625$) に風車を設置した場合の設置角度 θ に対する各条件の風車最大出力係数 C_{Pmax} の変化を設置角度 $\theta = 0^\circ$ のときのそれぞれの最大出力係数 $C_{Pmax}(\theta = 0^\circ)$ との割合で示す。フェンスに偏向板を設置しない場合と風車設置位置 $a = 0.00$ で偏向板を設置した場合の最大出力係数は $\cos^2\theta$ の曲線とおおよそ一致する。風車設置位置 $a = 0.625$ でフェンスに偏向板を設置した場合、設置角度が小さい $\theta = 10^\circ, 20^\circ$ においては他の条件とほぼ同じ値となるが、設置角度 $\theta = 30^\circ, 40^\circ$ においては最大出力係数が若干大きくなっている。

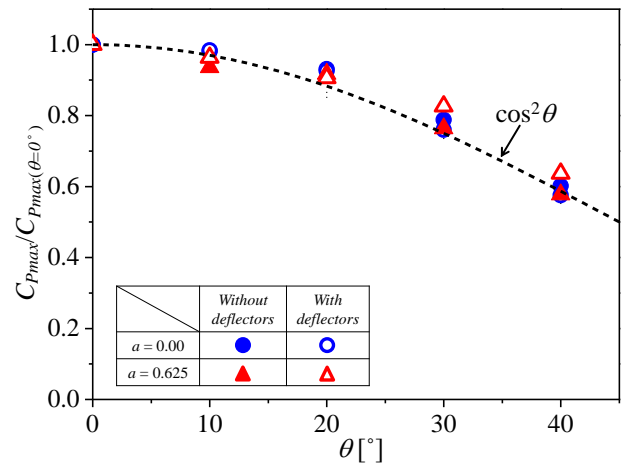


Fig.14 Maximum power coefficient ratios of the cross-flow wind turbine above the fence

4. 結論

本研究では、クロスフロー風車を組み込んだ道路用フェンスの実用化に向けて、フェンス上部におけるクロスフロー風車の最適な設置方法と斜風時における風車の性能について明らかにするために風洞実験を行い、以下の結論を得た。

1. 風車設置位置を垂直及び水平に変化させた場合に、フェンス上部に風車を風が左から右に流れている場合に時計回りとなるようにし、クリアランスを小さく、フェンス下流側に移動させて設置した場合に最も風車出力が高くなることを明らかにした。
2. フェンス上端に直角偏向板を設置することで、風車をフェンス下流側に設置した場合と同じ効果が得られることを明らかにした。
3. 防雪フェンスの無孔板領域の変化による風車の適切な設置位置を明らかにした。
4. 斜風時には風車への斜風の流入角度を θ とした場合に、風車出力は $\cos^2\theta$ の割合で低下することを明らかにした。さらにフェンス前方に偏向板を設置することによって、斜風時の風車出力の低下を抑制できることを明らかにした。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

道路用フェンス上部に設置したクロスフロー風車の性能に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 システム創成科学専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{なか} ^た ^{ひろ} ^{あき}
中 田 博 精

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、平成26年8月6日13時15分より第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文及び関係資料に基づき内容を検討した。さらに同日13時30分より口頭発表を行い、発表後に第2回学位論文審査委員会を開催し、協議の結果、以下の通り判定した。

申請者は、平成23年4月より国土交通省に入省後、自然科学研究科システム創成科学専攻に社会人入学した。申請論文は、強風にみまわれる地域の道路沿いに建設される防風・防雪フェンス上部において、電光標識等の電源用風力発電装置に使用するクロスフロー風車の性能を風洞実験で調べたものである。本風車は、フェンス上端の下流側に移動させて設置した場合に最も風車出力が高くなること、フェンス上端に直角偏向板を設置することで、風車をフェンス下流側に移動させずに同じ高出力が得られることを見出した。また、斜風時の風車への流入角度を θ とした場合の風車出力は $\cos^2 \theta$ で低下することを示し、風車端板やフェンス前方に偏向板を設置することによって、斜風時の風車出力の低下を抑制できることを明らかにした。

以上のように、本論文は、道路用フェンス上部に設置するクロスフロー風車の高性能化に関する有用なデータを示した研究であり、関連する風力エネルギー分野に寄与するところが大きいと判定し、博士(工学)に値するものと認定した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 (工 学)